

浮上式鉄道技術の最近の研究開発と 在来方式鉄道への応用

高橋 潔*

R & D on Superconducting Maglev and Attempts of Applications of its Technology to Conventional Railway System

Kiyoshi TAKAHASHI

Twelve years have passed since test operations commenced at the Yamanashi Maglev Test Line, and running tests have been smoothly ongoing as scheduled. The Maglev Technology Practicality Evaluation Committee acknowledged in the latest report of July 2009 that necessary technology has been almost established or in a prospect of establishment for commercial services with Superconducting Maglev System.

This paper introduces recent researches conducted by Railway Technical Research Institute on reliability and durability improvement or cost reduction of major components of the Superconducting Maglev System such as ground coils and superconducting magnets. In addition, we have introduced several attempts by which application of superconducting and linear motor technology to the conventional railway system has been studied.

キーワード：浮上式鉄道，超電導リニア，山梨実験線，超電導技術応用

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道（以下：超電導リニア）により、東京～名古屋間の営業線を2025年目途に建設することを東海旅客鉄道株式会社（以下：JR東海）が表明したのが2007年12月末である。以降2年が経過し、最近では想定ルートや中間駅の設置条件等に関する新聞記事が頻繁に掲載されるようになり、長年掛けて開発されてきた超電導リニアの実用化への歩みが着実に進んでいる。

山梨実験線では走行試験を開始してから今年で13年目を迎えている。この間に、鉄道総研とJR東海が共同で実施してきた当初8年間の技術開発成果に対して^{1) 2)}、2005年3月に超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会（国土交通省主催、以下：評価委員会）から『技術開発は大きく前進し、超電導磁気浮上式鉄道について実用化の基盤技術が確立したと判断できる』との総合技術評価を受け、その後は下記3項目の課題に向けた技術開発が進められてきた。

- ① 更なる長期耐久性の検証
- ② メンテナンスを含めた更なるコスト低減
- ③ 営業線適用に向けた設備仕様の検討

一方、JR東海が建設費を負担して山梨実験線の一般区間（未施工区間）の建設と既存設備の更新を行うことと

なり、2007年1月に山梨実験線の延伸および更新に関する「超電導磁気浮上式鉄道技術開発基本計画」と「超電導磁気浮上式鉄道山梨実験線建設計画」それぞれの変更が、国土交通大臣から事業三者（鉄道総研、JR東海、鉄道・運輸機構）に対して承認された。

この延伸・更新計画では、既設区間の両端を建設して当初計画の42.8km規模の走行区間を完成させ、同時に既設区間設備も最新の技術開発を反映させた設備に更新する。建設終了後の全線を使った走行試験は2014年度から3年間で予定されている。

2. 新たな技術評価（2009年7月）

2005年3月の技術評価から4年余が経過したことから、この間の技術開発状況に関して、2009年7月に評価委員会の最新の实用技術評価が取りまとめられた。評価の観点については前述の3項目の進捗状況に加え、新たに環境対策、異常時対応や保守体系に関する検討状況が評価の対象となった。個別の評価対象毎に詳細項目が整理され、具体的検証状況が示されて評価が行われた。国土交通省が公表した“超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価”³⁾の取りまとめ部分について以下に要約する。

引き続き技術開発が望まれる項目を整理した後に、総合技術評価と今後の技術開発の方向性への提言がまとめられた。

* 浮上式鉄道技術研究部 部長

特集：浮上式鉄道技術とその応用

(以下、評価報告書の評価結果部分の要約)

【引き続き技術開発に取り組む項目】

- ① 高温超電導磁石
- ② 励磁下検査（車両検査方法・体系並びに車庫・車両基地検査修繕設備）
- ③ 誘導集電による車上電源
- ④ 動態監視保全，保守用車を用いた保全
- ⑤ 高調波抑制による誘導障害等防止

【総合技術評価】

“超高速大量輸送システムとして運用面も含めた実用化の技術の確立の見通しが得られており，超電導磁気浮上式鉄道について営業線に必要な技術が網羅的，体系的に整備され，今後詳細な営業線仕様及び技術基準等の策定を具体的に進めることが可能となったと判断できる。”

【今後の課題と技術開発の方向性】

- ① 引き続き先行区間における走行試験等を実施し，詳細な営業線仕様の策定等を行う。
- ② 実用化に必要な技術が確立している土木構造物等の地上設備については，営業線工事に適用可能な詳細仕様及び技術基準等の策定を行う。
- ③ 実用化に必要な技術の確立の見通しが得られている，とした項目については，全線完成後の山梨実験線において営業線適用仕様での最終確認を行う。
- ④ 更なるコスト低減等に有効な技術開発を継続し，より良い営業線仕様に向けてレベルアップしていく。

3. 国立^{くにたち}研究所での浮上式鉄道の基礎研究

鉄道総研では評価委員会の提言を踏まえて，超電導リニアに関する耐久性等の評価やコスト低減技術を主眼とする基礎研究を続けている⁴⁾。その主なものは，以下に述べる超電導磁石や地上コイルに関する信頼性向上，耐久性評価やコスト低減技術に関する研究である。

3.1 超電導磁石

超電導リニアの基幹装置の超電導磁石は，超電導コイルを内包した4磁極分の内槽を真空容器の外槽で覆った構造をしている。外槽内部の補修は容易に行えず，基本的に超電導磁石には高い信頼性が要求される。超電導磁石に関する性能評価では，極低温における基礎現象の解明⁵⁾，耐振性能の評価手法，非破壊診断手法の開発や信頼設計に寄与する要素技術の開発を通して超電導磁石の性能向上を目指している。

3.1.1 信頼性・耐久性の向上

走行中の超電導磁石は推進コイルや浮上コイルからの電磁力により絶えず振動に晒されており，営業線使用条

件下で15年相当の耐久性が要求される。振動環境に対する超電導磁石の耐久性能を検証するために，走行試験を補完する手段として，機械加振法により加速試験を行う耐久性試験方法を開発した⁶⁾。山梨実験線で走行試験に供した超電導磁石を使って，耐用年数期間の走行を効率よく評価するための加振方法の改良を進めている。

信頼性向上に向けた要素開発として，高温超電導技術を応用した電流リードの開発を進めている。超電導磁石には，極低温状態のコイルを励磁や消磁する際に常温空間にある外部電源と接続するためのケーブル（電流リード）が必要となる。この電流リードには熱侵入と通電時のジュール発熱が共に少ない特性が求められる。高温超電導材の特性を生かし，現在の電流リード構造の大幅な簡素化を目指した取り組みを進めている⁷⁾。

3.1.2 コスト低減に向けて

現在の超電導磁石にはニオブ・チタンのコイル線材が用いられ，超電導コイルは液体ヘリウムに浸されて4.2K（約-269℃）の温度で超電導状態を維持している。超電導磁石内部は低温容器として複雑な構造をしており，高温超電導線材でコイルが構成できれば，冷却方式等の簡素化を通じて超電導磁石の信頼性の向上や製造コストの低減が期待される⁸⁾。

高温超電導線材として現在最も有望視され実用化研究が進められているのが希土類系（RE系）高温超電導線材である。超電導磁石へこのような酸化物超電導体を応用する場合には，磁場中での臨界電流密度（ J_c ）が優れている必要がある。線材開発状況ではビスマス（Bi）系線材が先行しているが，RE系線材による J_c 性能の向上と長尺化の開発が急展開で進んでおり，RE系線材を超電導磁石への適用するための基礎研究を開始した。詳細は本号の「希土類系高温超電導線材の浮上式鉄道用磁石への適用性評価」で紹介するが，線材の温度，印加磁場等を変えながら臨界電流密度 I_c を測定可能な試験装置を開発し，最新のRE系線材の磁場中の臨界電流特性等を取得した。これらのデータを基にレーストラック型小型超電導コイル（短軸外径175mm×長軸外径325mm）を試作し，超電導磁石の構成方法の研究を進めている。

3.2 地上コイル

リニアモータを構成する地上コイルは本システムに於けるもう一つの特徴的な設備である。地上コイルはガイドウェイ全線に敷設され長期屋外使用される設備のため，信頼性・耐久性の要求仕様は厳しく，且つコスト低減の必要性も高い設備である。

3.2.1 信頼性・耐久性の向上

営業線では30年以上の安定使用可能なコイル開発が必要であり，モールド樹脂材料の特性取得から手がけて，地上コイル性能評価手法の研究を進めている⁹⁾。

地上コイルは鉄心を持たない空芯コイルであるため、車上の超電導磁石との間に作用する電磁力を保持するために巻線コイルをモールド樹脂で一体成形している。樹脂材料は電気絶縁機能と同時にリニアモータの推進力や浮上力を支える機械的性能を兼ね備える必要があり、このような用途は非常に特殊なため、樹脂に対する機械的性能の定量的評価方法が確立されていない。

そこで推進コイルのエポキシ樹脂の耐疲労性の評価を行う必要性から、エポキシ樹脂の強度評価の基礎となるS-N線図データの取得や、累積損傷予測の推定方法に関する基礎データを取得してきた。

一方、実機コイルの各種試験を行うため、長期屋外課通電試験装置、地上コイル用電磁加振試験装置¹⁰⁾や促進耐候性試験装置などの独自の試験・評価装置を開発し、加速試験環境下で総合評価を行うことを目指している。

3.2.2 コスト低減に向けて

山梨実験線の地上コイルシステムは、超電導磁石の熱侵入問題への配慮から電磁力の高調波成分を極力低減する目的で、推進コイルは二層構造を、浮上コイルはピッチを小さくしたコイルを採用して三層に重ねた複雑な構造となっている。走行試験結果から超電導磁石の安定性が十分実証されたので、二層配置としていた推進コイルは従来の1/2に小型化したコイルを単層に配置し、浮上コイルと合わせて二層化とすることにより、製造コストと取り付けコストの大幅な削減が可能となった。

地上コイル構成の簡素化を更に進める目的で、鉄道総研では同一のコイルにて推進、浮上、案内を機能させる推進・浮上・案内兼用方式(PLG方式:combined Propulsion, Levitation and Guidance system)についての研究を進めている¹¹⁾。このコイルシステムについては、宮崎実験線当時に既に原理確認が行われ、山梨実験線に一部仮設して走行試験によって発生する電磁力特性の検証も終了した。現在では、高耐圧化に対応した耐衝撃性や絶縁性能の向上に関する研究を進めている。

3.3 車両運動解析と乗り心地評価

超電導リニアの車両構成は、車両断面の縮小と低重心化のため連接台車方式が採用され、電磁誘導による磁気ばね(1次ばね)で台車が非接触支持される点で、在来鉄道車両と異なる特徴を持つ。このためリニア車両の運動解析では、誘導反発式磁気ばねの電磁力シミュレーションと車両運動シミュレーションの連成が重要となる¹²⁾。

現行システムの基本仕様である地上～車上間の空隙設定に際しても、異常時の車両運動解析を基礎に検討された。山梨実験線では最大5両編成までの走行試験が行われたが、営業線では長大編成車両の運用が必要となるため、編成が長大化した場合の車両運動解析を深度化する研究を継続している。

また、超電導リニアで採用する誘導反発磁気浮上では、1次支持系に減衰要素が殆どないため台車の振動が減衰しにくく、且つ車体が軽量化されているため、車体の高周波振動が顕在化してきている。このような車体の高周波振動は、軽量車体にとって乗り心地に大きな影響を与えることが懸念されてきており、従来から用いている乗り心地評価方法の修正を視野に入れて研究を進めている。

4. 在来方式鉄道への応用

鉄道総研では超電導技術やリニアモータ技術をベースに、超電導リニアの枠を越えた研究分野への取り組みを進めている。次に2005年度より開始した「在来方式鉄道へのリニア技術の適用」のテーマについて¹³⁾、その概要を紹介する。

4.1 フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受

地球温暖化防止の観点から、省エネやエネルギーの有効活用の取り組みの重要性が増している。電気鉄道はエネルギー効率や温室効果ガス排出抑制の面で、既にその優位性は他の輸送機関を圧倒しているが、電気鉄道における回生エネルギーの利用やピークカット対策等、更なる省エネ施策を進めるためには高密度なエネルギー蓄積媒体が必要である。エネルギー蓄積媒体には高性能二次電池、電気二重層キャパシタ、フライホイールやSMES(超電導磁気エネルギー貯蔵)などが挙げられるが、単位重量当たりの蓄積エネルギー量と出力電力の大きさのバランスにおいて、フライホイールは着目すべき特長を有している。

一方、フライホイールの軸受に超電導磁気軸受を使用する電力貯蔵用フライホイールの開発が国家プロジェクトとして進められた¹⁴⁾。鉄道総研においても、超電導技術を駆使して電力貯蔵用フライホイールを目的とする独自の超電導磁気軸受の開発に着手した。

フライホイールでは低回転損失の実現が重要である。これまでの超電導磁気軸受では、非接触回転支持に永久磁石と超電導バルク体の組み合わせを用いるため、永久磁石の性能から載荷力密度に限界があった。さらに大きな載荷力の実現を目指して、超電導バルク体と超電導コイルの組み合わせによる独自の超電導磁気軸受を提案している。この超電導磁気軸受が成立すれば、小型で高効率なフライホイール蓄電システムが実現できると考えている。詳細は本号の「超電導磁気軸受と永久磁石磁気クラッチの電磁力解析と評価」を参照されたい。

4.2 SQUIDによるレール検査技術

超電導技術の応用として、高感度な磁気センサSQUID(超電導量子干渉計)を鉄道分野の非破壊検査に活用することを目指している。SQUIDは他の磁気センサに比べて

特集：浮上式鉄道技術とその応用

測定精度が非常に高いのが特長であり、その特性を活かし、目下検出方法が確立されていないレール表面に発生する白色層の検出を目標として研究を進めている。

レール頭頂面には、車輪の空転や滑走等に伴って車輪／レール間のすべりにより発生する摩擦熱の影響で白色層と呼ばれる熱変態組織が形成される場合がある。この白色層をき裂の起点とするレールシェリングが発生することが報告されており、白色層の厚さが20～30 μmを越えると、き裂の進展が速まる傾向がある¹⁵⁾。従って、白色層の早期検出が可能となれば、レール損傷の未然防止に寄与できると考えている。

感度が高すぎて扱いにくい磁気センサであるが、信号処理技術を駆使してこの扱いにくさを克服すれば、高感度を生かした新たな精密測定分野への展開が可能となる。詳細は本号の「SQUIDを用いたレール白色層の検出手法」を参照されたい。

4.3 リニアモータ制御によるレールブレーキ

リニアモータ技術を応用する分野として、過去にも研究実績のあるレールブレーキを研究対象とすることとした。レールブレーキの主要な方式である直流渦電流方式では、ブレーキ動作時の渦電流発熱によりレールの温度上昇を招くため日本では実用に至っていないが、ドイツのICE3では夏期の一部使用制限はあるものの、既に実用運転に供されており、非粘着ブレーキとして高速域で良好な特性を発揮している。この直流渦電流方式の欠点であるレールの温度上昇問題を解決できれば、レールブレーキも新たな非粘着ブレーキ装置としてその活用が期待される。

車上の電機子を交流励磁し、レールを二次導体としたリニアインダクションモータ(LIM)を構成すると、電機子への交番電流を制御すればレールの発熱となっていた車両の運動エネルギーの一部を電力回生させることが出来るようになる。このLIM方式によれば、レール発熱を抑えて所定のブレーキ性能を発揮するレールブレーキを構成できる可能性があり実現を目指している。詳細は本号の「リニアモータ型レールブレーキの等価回路による特性評価」を参照されたい。

5. まとめ

超電導リニアの技術開発の進展に対して、2009年7月に評価委員会の最新の实用技術評価が取りまとめられた。今回の評価では“超電導リニア技術の基盤技術は確立した”とした2005年の評価時点からの着実な技術開発の前進を認め、「超電導磁気浮上式鉄道について営業線に必要な技術が網羅的、体系的に整理され、今後詳細な営業線仕様及び技術基準等の策定を具体的に進める

ことが可能となった」という評価結果となった。

評価委員会の提言を踏まえ、鉄道総研では超電導リニアシステムに固有な超電導磁石と地上コイルを対象として、更なる信頼性向上やコスト低減等を目指した基礎研究を行っている。更に、今後は営業線設備では重要なテーマとなる検査・診断技術の研究開発にも注力していく考えである。

研究を開始して5年目となる在来鉄道への応用テーマにおいては、独自の試験装置等を考案しながら目標とする機能の実現性についてそれぞれ原理検証を進めてきた。今年度末には当初設定した研究目標に対する成果の取りまとめを行う予定である。

尚、鉄道総研が行う超電導リニアの技術開発は、一部国庫補助を受けて進めている。

文献

- 1) 秋田雄志:浮上式鉄道の開発と現況, 鉄道総研報告, Vol.17, No.5, pp.1～4, 2003
- 2) 高橋潔:浮上式鉄道の技術開発状況と展望, 鉄道総研報告, Vol.19, No.6, pp.1～4, 2005
- 3) http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo07_hh_000020.html
- 4) 高橋潔:浮上式鉄道の技術開発と在来方式鉄道への応用, 鉄道総研報告, Vol.22, No.11, pp.1～4, 2008
- 5) 清野寛:超電導コイルの摩擦発熱の現象解明とその抑制, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.5～10, 2006
- 6) 井上明彦 他:超電導磁石の耐久性検証, 鉄道総研報告, Vol.19, No.6, pp.15～18, 2005
- 7) 小方正文 他:超電導磁石への高温超電導バルク体電流リードの適用, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.11～16, 2006
- 8) 五十嵐基仁 他:永久電流高温超電導マグネットの開発, 低温工学誌, Vol.39, No.12, pp.651～658, 2004
- 9) 鈴木正夫:地上コイル用モールド樹脂の環境劣化特性, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.23～28, 2006
- 10) 田中実 他:地上コイル耐久性評価用電磁加振試験装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.17～22, 2006
- 11) 饗庭雅之 他:推進・浮上・案内兼用地上コイルの耐久性検証, 鉄道総研報告, Vol.19, No.6, pp.19～24, 2005
- 12) 吉岡博 他:山梨実験線車両MLX01の車両運動特性, 鉄道総研報告, Vol.12, No.8, pp.21～26, 1998
- 13) 岩松勝:在来方式鉄道へのリニア技術の応用の取組み, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.33～36, 2006
- 14) http://www.istec.or.jp/Web21/PDF/Past-pdf/J-pdf/05_05_all.pdf
- 15) 金鷹 他:レール表面に生じる白色層の実態分析, 鉄道総研報告, Vol.19, No.9, pp.17～22, 2005